Ce texte est une adaptation de l'article It's time to engineer the sky, publié par *Scientific American* en octobre 2023.

Climatologie

Le pari risqué de la géoingénierie

Faut-il modifier la stratosphère pour rafraîchir l'atmosphère, en bloquant une partie du rayonnement solaire ? Certains scientifiques défendent cette forme de géoingénierie ; d'autres alertent sur notre connaissance très insuffisante des mécanismes en jeu et des risques potentiels pour la pluie et les récoltes.

Douglas Fox

20 novembre 2023 | POUR LA SCIENCE N° 554 | Temps de lecture : 18 mn

Article réservé aux abonnés numériques

S'abonner

Climatologie | Atmosphère | Réchauffement climatique | Géoingénierie | Géoingénierie | Nuages

La tentation de refroidir la Terre en intervenant dans notre atmosphère est née en même temps que l'on a compris les effets à venir de l'augmentation rapide de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone.

© NASA's Earth Observatory

Pour ne rien manquer de *Pour La Science*, inscrivez-vous à nos newsletters (gratuites)

Courant février 2023, Luke Iseman et Andrew Song se sont rendus dans la banlieue de Reno, dans le Nevada. Là, ils ont rempli un ballon stratosphérique équipé d'une balise GPS de ce gaz incolore qu'est le dioxyde de soufre (SO_2), puis l'ont lâché, avant de suivre sa trajectoire vers la Californie. Les fondateurs de la « start-up climatique » Make Sunsets menaient par là une tentative provocatrice afin de créer un marché de « crédits de refroidissement » qui serait basé sur des injections dans la stratosphère de ce gaz à effet refroidissant. De fait, une fois libéré dans l'atmosphère, le SO_2 entraîne la création dans l'air d'une multitude de microgouttelettes, qui, telle une myriade de minuscules miroirs, renvoie de la lumière solaire vers l'espace, et refroidit ainsi la Terre.

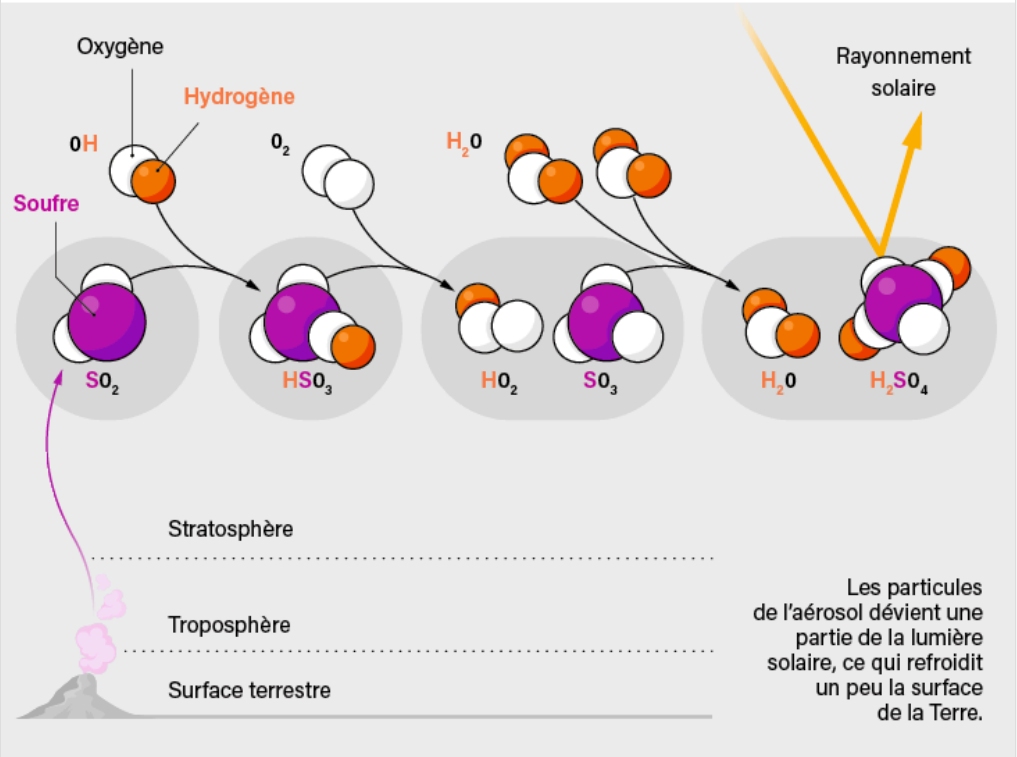
Les deux entrepreneurs vendent leurs « crédits de refroidissement » aux entreprises et aux particuliers : 10 dollars suffisent selon eux à financer l'injection d'un gramme de dioxyde de soufre, capable, à les en croire, de contrebalancer le réchauffement dû à l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère pendant un an. Ils avaient pour objectif de lancer leurs ballons depuis le Mexique, mais, après une interdiction du gouvernement de ce pays, ils sont revenus aux États-Unis… Ils se veulent en tout cas des pionniers de l'application d'une forme de géoingénierie solaire, cet ensemble de techniques proposées, mais pas encore mises en œuvre, pour « gérer » le rayonnement solaire. Dans ce qui suit, nous allons nous pencher sur les pour et les contre de la « gestion du rayonnement solaire » (GRS) à base de dioxyde de soufre, l'une des techniques les plus étudiées à ce stade.

Imiter les volcans

Il existe plusieurs formes de géoingénierie solaire . La GRS la mieux documentée toutefois, et donc la plus susceptible d'être déployée à ce stade, est l'injection d'aérosols d'acide sulfurique dans la stratosphère. Elle ne consiste en fait qu'à imiter l'effet refroidissant des grandes éruptions volcaniques. Lorsqu'en 1991, le Pinatubo, aux Philippines, est entré en éruption, il a projeté dans la stratosphère 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre. Le véritable « parasol d'aérosols » qui s'est ainsi constitué a refroidi la planète d'environ 0,5 °C ; puis la myriade de gouttelettes formant l'aérosol a achevé de chuter jusqu'à la surface de la Terre. Des recherches suggèrent qu'il suffirait d'un quart de l'éruption du Pinatubo de 1991 chaque année pour bloquer 1 à 2 % de la lumière solaire. Ne coûtant que quelques milliards de dollars par an, elle ralentirait le réchauffement climatique par des effets se faisant ressentir en quelques mois seulement après les injections.

Comment le dioxyde de soufre cache le soleil

Les volcans, les incendies et d'autres sources produisent du dioxyde de soufre (SO_2). Lorsque ce gaz s'élève jusqu'à la stratosphère, des réactions chimiques créent de nombreuses minuscules particules d'acide sulfurique (H_2SO_4), une forme d'aérosols pouvant séjourner jusqu'à trois ans dans l'atmosphère. Ces aérosols renvoient vers l'espace une partie du rayonnement solaire, réduisant par là le réchauffement des surfaces terrestres et océaniques.



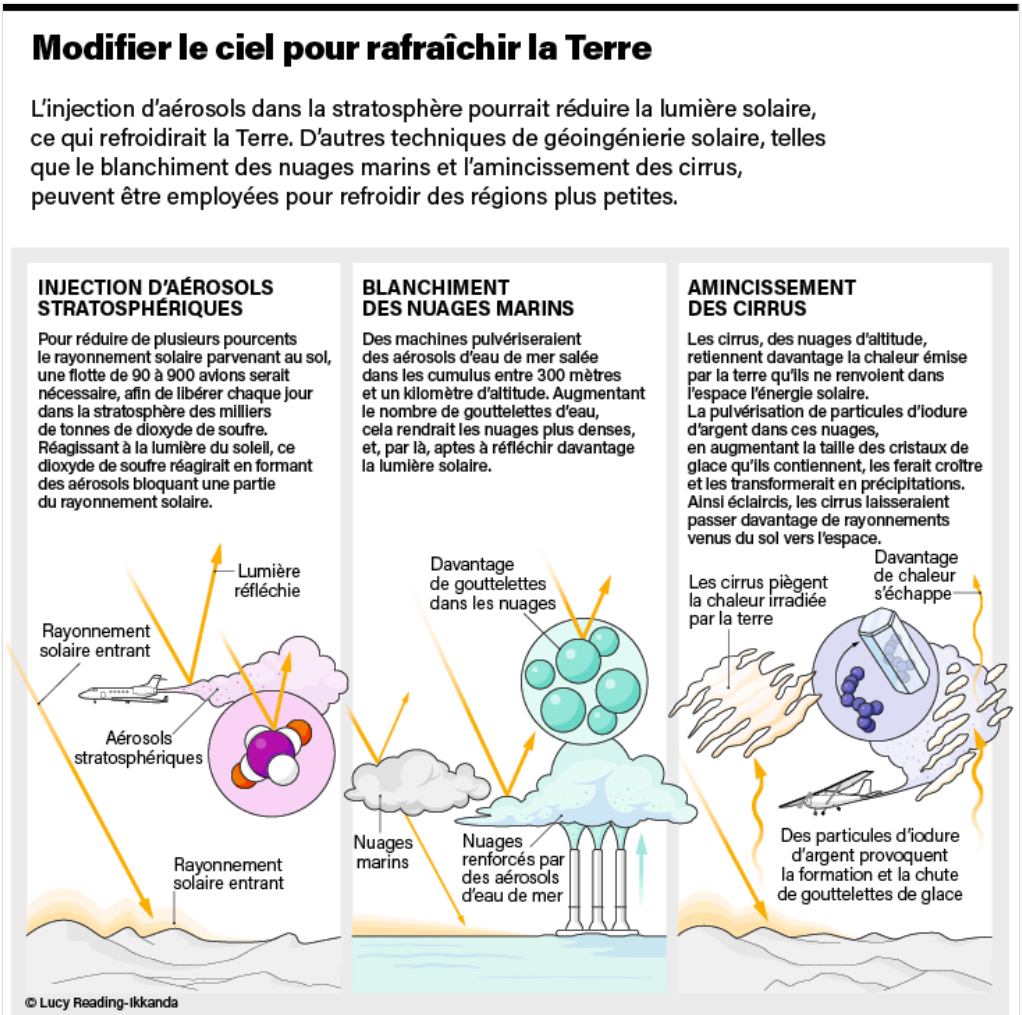
Or réduire de façon drastique notre consommation de combustibles fossiles prendra des décennies au minimum, tandis que le dioxyde de carbone que nous émettrons pendant cette longue période aggravera encore la crise climatique. Alors, il y a bien l'alternative de la captation directe de dioxyde de carbone dans l'air. Certes, cette action pourrait ralentir le réchauffement mondial, mais les machines nécessaires pour capter des milliards de tonnes de CO_2 seraint susceptibles d'augmenter d'un quart la consommation d'énergie par l'humanité, et, potentiellement, d'entraîner l'émission d'encore plus de gaz à effet de serre… En comparaison, la gestion du rayonnement solaire à base de dioxyde de soufre produit ses effets très vite, ce qui n'est politiquement pas sans attrait. Après tout, « il s'agit de la seule chose que nos gouvernants puissent faire, qui aurait une influence perceptible sur la température de la planète pendant leur mandat », souligne le climatologue Ken Caldeira, chercheur émérite à la Carnegie Institution, un collaborateur de l'organisation Breakthrough Energy, fondée par Bill Gates pour accélérer l'innovation en production d'énergie durable.

Une technique inquiétante

Mais la GRS à base de SO_2 fait aussi frémir : l'idée qu'après avoir perturbé son atmosphère, l'humanité tente de la réparer semble – pour le moins – dangereuse, puisque nous pourrions ainsi l'endommager encore plus… S'agit-il là de l'une de ces arrogances faustiennes, qui risquent de se retourner contre nous ? Pour Ken Caldeira et nombre de ses collègues, la GRS doit être envisagée avec une extrême prudence, si tant est qu'elle le soit. Son déploiement est susceptible en effet de sensiblement blanchir notre ciel bleu et amincir la couche d'ozone stratosphérique qui protège la biosphère terrestre du rayonnement ultraviolet. La GRS pourrait aussi modifier la météorologie locale et déplacer les moussons, si nécessaires aux cultures nourrissant des milliards de personnes. Enfin, elle n'aurait aucun effet sur d'autres conséquences de l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2, à commencer par l'acidification des

océans, qui nuit à la capacité des coraux, des mollusques et d'une partie du plancton de secréter leurs squelettes et leurs coquilles. Enfin, les critiques craignent que la croyance en une échappatoire technique au réchauffement climatique ne réduise la volonté commune de diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

C'est pour ces raisons que plus de 400 chercheurs ont cosigné une lettre ouverte aux gouvernements pour les exhorter à interdire les essais de GRS. D'autres, même si c'est à contrecœur, pensent plutôt qu'il faut l'étudier : « Tous ceux que je connais qui travaillent sur la GRS sont contre, explique ainsi Alan Robock, mais si d'aucuns étaient tentés de s'y lancer dans l'avenir, mieux vaut qu'ils en connaissent les conséquences. » Climatologue à l'université Rutgers, Alan Robock est réputé pour avoir étudié les effets potentiels d'un hiver nucléaire, et c'est avec un impératif moral analogue qu'il a décidé de se mettre à caractériser les conséquences que pourrait avoir la GRS.


Modifier le ciel pour rafraîchir la Terre
L'injection d'aérosols dans la stratosphère pourrait réduire la lumière solaire, ce qui refroidirait la Terre. D'autres techniques de géoingénierie solaire, telles que le blanchiment des nuages marins et l'amincissement des cirrus, peuvent être employées pour refroidir des régions plus petites.
INJECTION D'AÉROSOLS STRATOSPHÉRIQUES
Pour réduire de plusieurs pourcents le rayonnement solaire parvenant au sol, une flotte de 90 à 900 avions serait nécessaire, afin de libérer chaque jour dans la stratosphère des milliers de tonnes de dioxyde de soufre. Réagissant à la lumière du soleil, ce dioxyde de soufre réagirait en formant des aérosols bloquant une partie du rayonnement solaire.
Lumière réfléchie
Rayonnement solaire entrant
Aérosols stratosphériques
Rayonnement solaire entrant
BLANCHIMENT DES NUAGES MARINS
Des machines pulvériseraient des aérosols d'eau de mer salée dans les cumulus entre 300 mètres et un kilomètre d'altitude. Augmentant le nombre de gouttelettes d'eau, cela rendrait les nuages plus denses, et, par là, aptes à réfléchir davantage la lumière solaire.
Davantage de gouttelettes dans les nuages
Nuages marins
Nuages renforcés par des aérosols d'eau de mer
AMINCISSEMENT DES CIRRUS
Les cirrus, des nuages d'altitude, retiennent davantage la chaleur émise par la terre qu'ils ne renvoient dans l'espace l'énergie solaire. La pulvérisation de particules d'iodure d'argent dans ces nuages, en augmentant la taille des cristaux de glace qu'ils contiennent, les ferait croître et les transformerait en précipitations. Ainsi éclaircis, les cirrus laisseraient passer davantage de rayonnements venus du sol vers l'espace.
Les cirrus piègent la chaleur irradiée par la terre
Davantage de chaleur s'échappe
Des particules d'iodure d'argent provoquent la formation et la chute de gouttelettes de glace
© Lucy Reading-Ikkanda

Ceux qui sont en faveur d'essais et de recherches sur la GRS ne manquent pas de souligner qu'il est de plus en plus clair que l'humanité ne va pas parvenir à réduire assez ses émissions de gaz à effet de serre pour maintenir le réchauffement planétaire en deçà de 1,5 degré Celsius par rapport aux températures préindustrielles. Ils avancent dès lors qu'un réchauffement continu de l'atmosphère terrestre sera tout aussi lourd de conséquences que le recours éventuel à la GRS. Dans un rapport récent de l'Organisation météorologique mondiale, on lit en effet que la probabilité que la température annuelle moyenne de la planète dépasse brièvement de 1,5 degré Celsius au-dessus les niveaux préindustriels d'ici à 2027 est de 66 %. Or un tel niveau de réchauffement sera dangereux, car son franchissement signifierait que l'environnement subirait des dommages extrêmes. Le 27 février 2023, quelques jours après l'essai mené par Make Sunsets, 110 climatologues – dont James Hansen, l'un des premiers lanceurs d'alerte à propos du climat, aujourd'hui chercheur associé à l'université Columbia – publiaient ensemble une autre lettre ouverte exhortant les gouvernements à soutenir davantage la recherche sur la GRS . Le lendemain, les Nations unies lançaient un appel en faveur d'une réglementation internationale susceptible d'ouvrir la voie à des expérimentations ; puis, en juin 2023, le gouvernement américain publiait un rapport décrivant à quoi un programme de recherche sur la gestion du rayonnement solaire pourrait ressembler. David Keith, qui a étudié la GRS ces vingt dernières années, depuis peu responsable du département d'ingénierie des systèmes climatiques à l'université de Chicago, souligne que, même si la mise en œuvre d'une forme de GRS réduisait la température moyenne planétaire, elle ne ramènerait pas pour autant le climat à son état préindustriel. Son intérêt serait plutôt d'atténuer les difficultés venant vers nous. Ainsi, la gestion du rayonnement solaire apparaît de plus en plus comme une sorte de médicament pour la planète, qui – prescrit de façon responsable, c'est-à-dire à petite dose et pour un temps limité – pourrait aider l'humanité à passer les un à deux siècles risquant d'être dangereusement chauds.

Les premiers pas de la GRS

L'idée de rendre la Terre plus réfléchissante afin de contrer le réchauffement climatique remonte à l'époque de la découverte de l'augmentation du taux atmosphérique de dioxyde de carbone. C'est en effet en 1965 que des chercheurs ont suggéré au président américain Lyndon Johnson (1908-1973) que le réchauffement dû aux émissions de gaz à effet de serre pourrait être contré en répandant des particules réfléchissantes dans l'océan. En 1974, le climatologue russe Mikhail Budyko suggéra de son côté que des avions ou des fusées pourraient injecter du dioxyde de soufre dans la stratosphère afin de réfléchir la lumière du soleil. Cette technique, écrivait-il, « devrait être développée sans délai ». Au cours des deux décennies suivantes, l'idée d'une gestion technique de l'atmosphère n'eut pas beaucoup de succès. Puis en 1998, lors d'une conférence des instituts Aspen – un réseau international d'échange et de réflexion –, Lowell Wood, ingénieur au laboratoire national Lawrence-Livermore, en Californie, se fit remarquer en vantant les effets refroidissants des aérosols stratosphériques. L'homme, connu aux États-Unis pour avoir été l'un des premiers partisans du système de défense antimissile « Star Wars », reçut un accueil glacial. « Ken Caldeira et moi-même avons presque élevé la voix pour le contredire, se souvient David Keith, tant il exagérait le potentiel de la technique. » Leur scepticisme s'explique : en absorbant les rayonnements provenant de grandes longueurs d'onde émises par le sol terrestre, le dioxyde de carbone atmosphérique induit un échauffement uniforme de l'équateur aux pôles. Cet « effet de serre » se poursuit tout au long de l'année, jour et nuit, alors que, pour sa part, la lumière solaire échauffe la planète pendant le jour et davantage aux basses latitudes. Les deux chercheurs s'inquiétaient donc, car ils prévoyaient qu'une réduction de l'intensité du rayonnement solaire parvenant dans l'atmosphère aurait des effets inégaux selon les régions de la planète.

Une fois rentré à Livermore, où il travaillait aussi, Ken Caldeira persuada le climatologue Govindasamy Bala de simuler les effets

climatiques de la proposition de Lowell Wood pour la tester. Les deux chercheurs imposèrent à leur modèle de climat une réduction de la lumière solaire entrante de 1,7 % – soit assez pour contrecarrer l'échauffement dû à une concentration atmosphérique de CO_2 double de la valeur préindustrielle. « L'idée s'est révélée fonctionner bien mieux que ce à quoi nous nous attendions », raconte Ken Caldeira. Publiés en 2000, les résultats obtenus indiquent que la GRS imaginée refroidirait un peu plus les tropiques que les pôles, et que ses effets se feraient davantage sentir en été qu'en hiver. Toutefois, dans l'ensemble, le refroidissement planétaire prédit s'avérait nettement plus uniforme que ce que craignaient Govindasamy Bala, Ken Caldeira et David Keith.

Après cela, une équipe de chercheurs dont faisait partie Alan Robock tenta de reproduire ces résultats à partir, cette fois, d'une douzaine de modèles climatiques différents. Publiées en 2013, leurs conclusions douchèrent quelque peu les premiers espoirs, puisqu'elles prédisaient que le refroidissement devenait moins uniforme avec l'augmentation des concentrations d'aérosols stratosphériques. Ainsi, si une dispersion d'aérosols dans la stratosphère devait être utilisée pour compenser le réchauffement moyen causé par un quadruplement des niveaux de dioxyde de carbone, alors la température moyenne des tropiques baisserait de 0,3 °C par rapport à l'ère préindustrielle, tandis que celle des pôles serait plus élevée de 0,8 °C… Les pergélisols et la banquise seraient donc confrontés à des températures plus élevées, empêchant leur rétablissement complet. Cela suggérait ainsi que nous ne parviendrions pas à inverser certains des effets les plus nocifs du changement climatique.

Govindasamy Bala mit un autre fait inquiétant en évidence : une réduction possible des précipitations par les aérosols stratosphériques. Il est bien connu en effet qu'un échauffement de la surface de l'océan accroît l'évaporation d'eau, ce qui, à son tour, entraîne une augmentation des précipitations, de sorte qu'il

semblait logique que l'inverse soit vrai. Toutefois le chercheur s'aperçut que l'occultation partielle du soleil par les aérosols pourrait avoir l'effet de réduire les précipitations plus qu'elle ne réduit la température. Cela s'explique par le fait que bloquer une partie de la lumière solaire, sans rien changer à la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone, réduit aussi légèrement la tendance de la vapeur d'eau à former des nuages. Les simulations effectuées à l'aide des douze modèles indiquent que si l'humanité mettait en place une GRS pour contrecarrer totalement le réchauffement dû à un quadruplement du CO2, certaines régions des tropiques recevraient 5 à 7 % de précipitations en moins chaque année par rapport à l'époque préindustrielle, ce qui pourrait nuire gravement à l'agriculture et aux forêts locales.

Ces observations et d'autres ont amené David Keith et ses collègues à suggérer une GRS moins intense. Les injections d'aérosols stratosphériques ne seraient utilisées que temporairement pour réduire les effets du changement climatique, ce qui donnerait aux pays le temps de diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre et de séquestrer du CO_2 atmosphérique.

En 2018, David Keith a esquissé ce scénario dans un article cosigné avec les climatologues Douglas MacMartin, de l'université Cornell, et Katharine Ricke, de l'institut océanographique Scripps. Les trois chercheurs ont modélisé un monde dans lequel les émissions de gaz à effet de serre seraient assez réduites et où l'industrie de la séquestration du CO_2 serait suffisamment développée pour que la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère culmine à environ deux fois sa valeur préindustrielle vers 2070, avant de diminuer lentement. Pareil scénario entraînerait un réchauffement d'environ 3 °C, ce qui est considérable. Pour limiter le réchauffement à 1,5 °C, des injections d'aérosols stratosphériques commenceraient vers 2030 et augmenteraient lentement, pour atteindre leur maximum en 2070 avant d'être progressivement réduites puis arrêtées après

deux siècles environ, une fois la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone assez basse.

Peter Irvine, climatologue à l'University College, de Londres, a testé ce scénario à l'aide de treize modèles climatiques. Publiés en 2019 dans *Nature Climate Change*, ses résultats suggèrent que, pendant la période d'augmentation de la concentration en CO_2, les aérosols stratosphériques réduiraient le réchauffement et les précipitations extrêmes (y compris les sécheresses et les inondations) sur 99,6 % de la surface terrestre libre de glace.

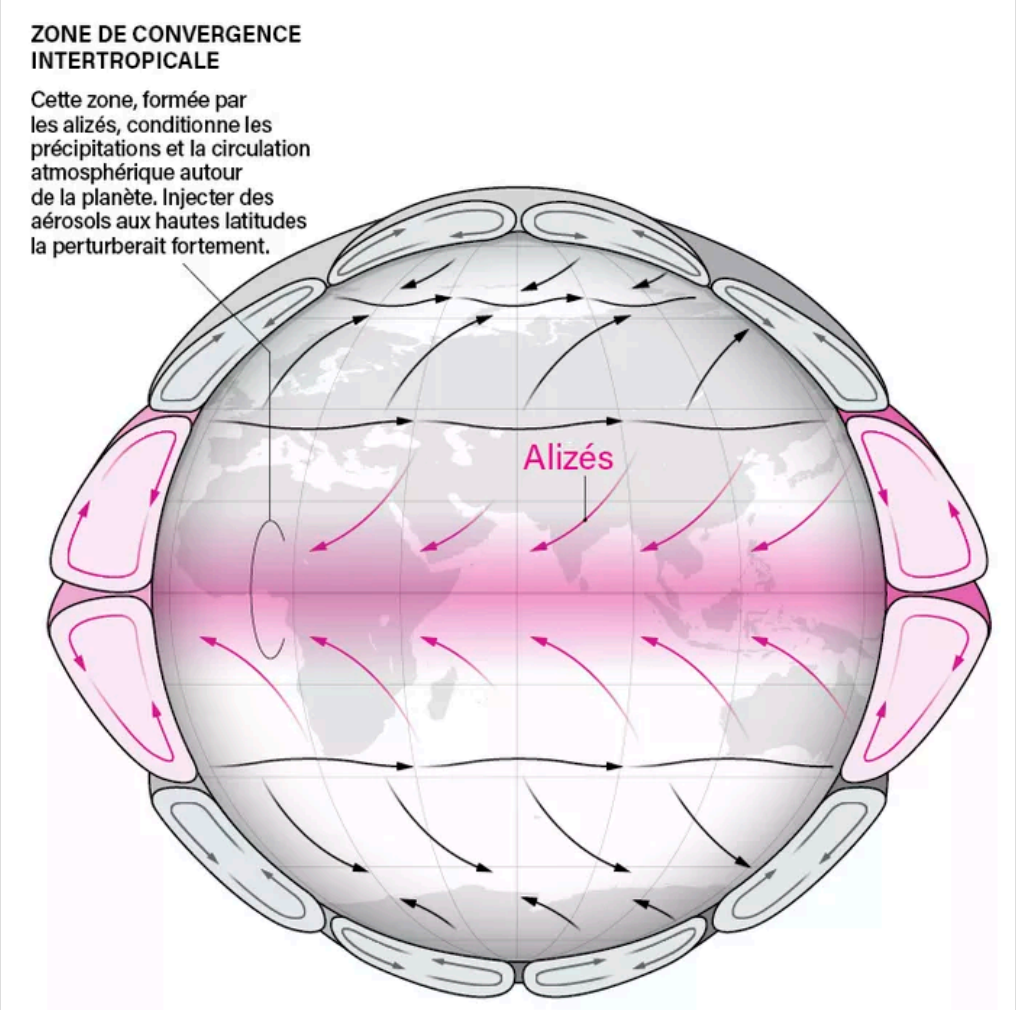
Pas si simple

Pour que la mise en œuvre d'une telle GRS fonctionne, il faudra cependant surmonter des obstacles majeurs. À 20 kilomètres d'altitude, l'atmosphère ne ressemble ni à celle dans laquelle nous respirons ni au milieu spatial. À pareille hauteur, la pression de l'air n'est que de 5 % de celle qui règne au sol. La portance engendrée par les ailes d'avion y est si faible que seuls quelques avions de recherche spécialement prévus peuvent voler dans un air aussi fin. Le plus connu est l'*ER-2*, de la NASA, un dérivé de l'avion espion *U-2* doté d'un fuselage minuscule et d'ailes surdimensionnées. Seule personne à bord, son pilote doit porter une combinaison pressurisée, telle celle d'un astronaute, et la charge utile de l'engin se limite à deux tonnes…

Au cours des cinquante dernières années, les *ER-2* ont effectué plus de 4 500 missions de recherche, prélevant des échantillons d'aérosols et de gaz dans la stratosphère, dans les panaches d'éruptions volcaniques, nous offrant la possibilité d'affiner notre compréhension de la destruction de la couche d'ozone. Ces albatros de la haute altitude ont contribué à créer les bases scientifiques sur lesquelles repose la gestion du rayonnement solaire, mais il est clair qu'ils ne pourront jamais transporter en hauteur des tonnes et des tonnes de SO_2.

Wake Smith, chercheur à l'École environnementale de Yale (Yale School of the Environnement), affirme que des avions adaptés pourraient être développés sur des bases déjà existantes. Depuis 2017, cet ancien cadre de l'industrie aéronautique peaufine le concept d'un avion à six moteurs inspiré du *B-47 Stratojet*, un appareil militaire de haute altitude conçu dans les années 1940 pour larguer des bombes nucléaires en Union soviétique. Le dispositif imaginé par Wake Smith serait adapté au transport et à la dispersion de 15,7 tonnes d'aérosol à 20 kilomètres d'altitude. En fonction de la GRS souhaitée, le chercheur envisage de 90 à 900 avions effectuant des missions quotidiennes d'ici 2100. La construction du premier prototype prendrait de sept à dix ans ; celle d'une flotte, vingt ans.

Wake Smith estime qu'une fois pareille flotte opérationnelle, la GRS mise en place coûterait annuellement quelque 18 milliards de dollars par degré Celsius de refroidissement. C'est peu comparativement aux centaines de milliards de dollars par an qu'il faudrait dépenser pour retirer des milliards de tonnes de CO_2 de l'atmosphère. Toutefois, cette dernière action est sans risque, tandis que la GRS – rappelons-le – pourrait avoir des conséquences cauchemardesques imprévues.


ZONE DE CONVERGENCE INTERTROPICALE
Cette zone, formée par les alizés, conditionne les précipitations et la circulation atmosphérique autour de la planète. Injecter des aérosols aux hautes latitudes la perturberait fortement.
Alizés

© Lucy Reading-Ikkanda

À cet égard, expliquons qu'une grande part de l'humanité dépend de la météorologie de la zone de convergence intertropicale, une vaste région de dépressions ceinturant la planète le long de l'équateur. Cette bande, où les pluies et les orages sont constants, s'étend chaque année jusqu'à 2 500 kilomètres vers le nord et vers le sud, toujours dans l'hémisphère le plus chaud. Ces expansions annuelles engendrent les moussons, qui arrosent massivement chaque année l'Inde, l'Asie du Sud-Est, la zone tropicale africaine et d'autres régions, déversant plus de 45 000 kilomètres cubes d'eau ! Cette eau permet des cultures, qui, en Asie du Sud seulement, nourrissent 1,5 milliard de personnes…

En 2008, Govindasamy Bala a pris un poste à l'Institut des sciences de Bangalore afin d'y étudier les effets des activités humaines sur la mousson indienne. Ses simulations ont montré

que si des aérosols étaient injectés à l'équateur, ils se répandraient dans les hémisphères Nord et Sud avec peu d'impacts sur les moussons. Point à noter, car d'autres chercheurs ont plutôt proposé une stratégie d'injection aux hautes latitudes nord afin de ralentir le réchauffement rapide de l'Arctique sans refroidir trop les tropiques. Sa mise en œuvre aurait un « énorme impact » sur les moussons indiennes, pointe Govindasamy Bala. Publiées en 2022, ses dernières simulations suggèrent que si des dispersions de dioxyde de soufre suffisantes pour refroidir la planète de 1,5 °C étaient entreprises à 30° de latitude nord, la mousson pourrait se déplacer vers le sud d'environ 150 kilomètres, ce qui menacerait les récoltes indiennes en réduisant les précipitations estivales sur le sous-continent de 29 %.

Les recherches de Govindasamy Bala soulignent en tout cas une évidence : l'injection d'aérosols dans la stratosphère a des conséquences à grande échelle. En 2021, Katharine Ricke a modélisé les effets qu'auraient de telles opérations au-dessus de l'océan Indien visant à augmenter les précipitations et à inverser la sécheresse de longue date régnant dans le Sahel. Ce travail a révélé que l'intervention ne ferait que déplacer les sécheresses vers l'Afrique de l'Est. En 2022, une autre modélisation a suggéré que les aérosols stratosphériques pourraient favoriser l'arrivée du paludisme en Asie du Sud et en Afrique subsaharienne. Certaines des régions où prolifère *Anopheles gambiae*, le moustique propageant la maladie, deviendraient trop fraîches pour lui ; d'autres, qui sont actuellement trop chaudes, se refroidiraient assez pour que le redoutable vecteur s'implante. Ces vastes changements météorologiques pourraient nuire à des « pays souvent non représentés dans la salle lorsque nous parlons de géoingénierie », pointe Christopher Trisos, écologiste à l'université du Cap, en Afrique du Sud, qui a codirigé l'étude sur le paludisme.

Le point sur la situation

Les partisans de la GRS se fondent sur des analyses suggérant que cette technique pourrait réduire les extrêmes climatiques à faibles coûts. Ses détracteurs mettent en avant les recherches montrant les ravages que la GRS serait à même de causer. Cependant, les chercheurs qui tentent d'en évaluer les effets admettent que la plupart de ces prévisions comportent d'énormes incertitudes, à commencer par celles attachées aux modèles climatiques utilisés. Si la GRS a donné des résultats cohérents dans plus d'une douzaine de modèles climatiques, ce n'est pas parce que des approches très diverses convergent vers les mêmes réponses, mais plutôt parce que « trop de gens utilisent des modèles climatiques similaires », souligne David Keith. Si les hypothèses faites lors de la construction d'un modèle sont erronées, alors cela peut être potentiellement le cas de tous.

Les modèles climatiques utilisés pour prévoir les effets de la GRS contiennent des dizaines de paramètres représentant des conditions physiques allant de la réactivité chimique des gouttelettes d'aérosol à leur taille. De minuscules changements de la valeur de ces paramètres peuvent avoir des effets considérables sur les résultats obtenus. Un aspect illustre bien la complexité de la modélisation : une gouttelette d'un micromètre de diamètre reflète plus efficacement la lumière du soleil, car son diamètre est proche de la longueur d'onde de la plupart des rayonnements solaires entrants ; celles qui sont plus grosses ne sont pas seulement moins efficaces, mais peuvent en fait provoquer un échauffement en absorbant les ondes longues émises par le sol, qui, en leur absence, s'échapperaient dans l'espace. Un autre détail crucial est la vitesse à laquelle les gouttelettes provoquent des réactions chimiques détruisant l'ozone. Lorsque les chercheurs tentent de prévoir les effets de l'injection stratosphérique, ils introduisent leurs meilleures estimations pour ces variables. Le problème est que la plupart en utilisent des similaires. « Est-ce que nous nous trompons, telle est la question ! », s'exclame David Keith.

Pour dissiper cette incertitude, le chercheur veut passer aux « grands ensembles », c'est-à-dire à des centaines de versions différentes du même modèle, nourries par des combinaisons différentes de paramètres. Pour le moment, peu de recherches ont été faites sur ce principe, raison pour laquelle David Keith prévoit d'en superviser à l'université de Chicago. L'éventail des résultats ainsi produits pourrait alors être intégré dans des modèles qui prévoient comment la GRS serait susceptible d'influencer les rendements agricoles, la survenue d'incendies de forêt, de tempêtes ou encore la propagation du paludisme et d'autres maladies.

Toutefois, quel que soit le nombre de grands ensembles mis en place, il restera impossible de savoir comment la gestion du rayonnement solaire fonctionnera tant qu'elle n'aura pas été testée dans la réalité. En 2011, David Keith et Ken Caldeira ont publié une analyse suggérant qu'un essai significatif d'injection stratosphérique prendrait une décennie. Plusieurs centaines de milliers de tonnes de dioxyde de soufre devraient être injectées chaque année – assez en théorie pour inverser 10 % du réchauffement causé par un doublement des niveaux de dioxyde de carbone préindustriels. En d'autres termes, l'expérience minimale viable « ne se distinguerait pas d'un déploiement ! », clarifie Ken Caldeira.

Avant cela toutefois, des expériences préliminaires doivent aussi être menées, qui réduiraient les incertitudes sur le pouvoir prédictif des modèles. Les chercheurs pourraient par exemple évaluer les effets des dispositifs d'injection imaginés, libérant de quelques kilogrammes à quelques tonnes de SO_2 dans la stratosphère. Pareils essais renseigneraient sur la dimension des gouttelettes produites, et permettraient d'évaluer si elles conservent leur taille en altitude, nous informant de la sorte des réactions chimiques qu'elles provoquent, tout particulièrement sur les effets sur l'ozone atmosphérique.

S'agissant d'essais de GRS, les difficultés à franchir sont considérables, comme l'illustrent les mésaventures en Suède de David Keith et du chimiste de l'atmosphère de l'université de Harvard Frank Keutsch. Les deux chercheurs avaient prévu une « expérience de perturbation contrôlée de la stratosphère » (*stratospheric controlled perturbation experiment*) conçue pour imiter la traînée d'aérosol que libérerait un avion stratosphérique. Un ballon autopropulsé devait être envoyé à 20 kilomètres d'altitude pour lâcher dans le sillage de son hélice un demi-kilo de sulfate, soit 0,3 % de la masse de la même matière émise au cours de la traversée de l'Atlantique par un avion commercial. Les chercheurs avaient prévu que le premier lancement, programmé pour juin 2021 dans le nord de la Suède, ne servirait qu'à tester l'équipement sans libérer de gaz, mais il n'a jamais eu lieu. En février 2021, en effet, le Conseil des Samis, des autochtones éleveurs de rennes, a protesté auprès du gouvernement suédois contre le fait de ne pas avoir été informé sur la réalisation de cet essai au-dessus de leur tête. Avec l'aide de Greenpeace Suède et d'autres associations de défense de l'environnement, le conseil est parvenu à le faire annuler par le gouvernement suédois. Ses protestations n'ont jamais porté sur l'impact environnemental de l'essai, mais sur la possibilité même de GRS. Ce cas est caractéristique de l'attitude de nombreux opposants à la GRS, qui souhaitent purement et simplement faire interdire les expériences servant à l'évaluer.

Pour autant, certains chercheurs poursuivent leurs travaux, car ils estiment que c'est ce qui est responsable. « Les gens qui devraient le plus plaider en faveur de l'expérimentation de la GRS sont ceux qui craignent qu'elle ait des conséquences funestes, estime Ken Caldeira. Si une expérience met en évidence des conséquences vraiment terribles, alors elle sera particulièrement utile. » Si la GRS doit être étudiée et possiblement même mise en œuvre, il est préférable de commencer plus tôt et plus progressivement, afin que ses inconvénients puissent être bien compris. Paradoxalement, la GRS pourrait bénéficier de davantage de soutien public si elle est retardée jusqu'à ce que les

effets du changement climatique deviennent extrêmes, puis, à ce moment-là, si elle est mise en œuvre rapidement.

Les essais, même de petite échelle, ne sembleront légitimes que s'ils sont financés et réglementés par le gouvernement, pense pour sa part Kelly Wanser, la directrice de Silver Lining, une organisation non gouvernementale qui pousse la Fondation nationale pour la science et d'autres agences gouvernementales américaines à financer la recherche sur la GRS et à établir des règles pour l'encadrer. Selon Katharine Ricke, les chercheurs apprécieraient ce type de gouvernance, qui existe déjà depuis longtemps dans d'autres domaines scientifiques sensibles, telle la recherche médicale. L'objectif serait de créer un organisme international, semblable au Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), pour fixer les priorités de la recherche tout en tenant compte des intérêts des pays riches et des pays pauvres. Toujours d'après Katharine Ricke, sans structure de ce genre, la recherche légale ne progressera pas, alors que des « activités sauvages sont en train d'apparaître ».

De fait, deux mois après leur opération de lancement à Reno, Luke Iseman et Andrew Song ont lâché (devant les caméras) depuis le port de plaisance de Berkeley, en Californie, trois ballons stratosphériques correspondant au financement par leurs clients de 2 840 dollars d'unités de refroidissement. « Cela équivaut à la quantité de soufre émise en quelques minutes par un 747 », a théâtralement déclaré Luke Iseman avant de lâcher un ballon.

L'essentiel

La plus étudiée des techniques de gestion de l'atmosphère envisagée consiste à imiter l'un des effets des éruptions volcaniques en injectant du dioxyde de soufre dans la stratosphère.

Pareille action aurait un impact refroidissant temporaire sur l'atmosphère, mais ses effets collatéraux mal connus inquiètent la

plupart des climatologues.

En compensant en partie les conséquences de l'augmentation de la concentration en gaz à effets de serre, la géoingénierie stratosphérique est susceptible de ménager davantage de temps à une réduction massive des émissions. Ce pourquoi certains chercheurs plaident pour un encadrement et un soutien publics des recherches consacrées à cette technique.

Auteur

Douglas Fox

Douglas Fox est journaliste scientifique à San Francisco, pour *New Scientist*, *Discover*, *Christian Science Monitor*…

Voir tous ses articles

Références

K. S. Krishnamohan et G. Bala, Sensitivity of tropical monsoon precipitation to the latitude of stratospheric aerosol injections, *Climate dynamics*, 2022.

G. Metcalf, Comment définir une bonne taxe carbone ?, *Pour la science,* 2020.

P. Irvine *et al.*, Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards, *Nature Climate Change*, 2019.

D. G. MacMartin *et al.*, Solar geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5°C Paris target, *Philosophical Transaction of*

the Royal Society A, 2018.

V. Masson-Delmotte, L'humanité modifie le climat, *Pour la Science*, 2017.

G. Myrhe *et al.*, chapitre 8 dans Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, Cambridge University Press, 2013.

R. Kunzig, Une ombrelle pour la planète Terre, *Pour la science*, 2009.

B. Govindasamy et K. Caldeira, Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO_2-induced climate change, *Geophysical Research Letters*, 2000.

Pour la Science
La science expliquée par ceux qui la font
Comment garder des secrets dans un monde quantique ?
GLACIERS EN SURSIS
Découvrez nos abonnements à partir de 5,50€/mois
Sans engagement
Je m'abonne

Pour la Science
La science expliquée par ceux qui la font
Découvrez nos abonnements à partir de
5,50€/mois
Sans engagement
Je m'abonne
Comment garder des secrets dans un monde quantique ?
Pour la Science
04/24
Quelles perspectives pour la fin du siècle ?

À la Une

Intelligence artificielle | 7mn

L'évolution, un guide de survie face à l'IA

Art & science | 4mn

E.A.T. : retour sur les origines de l'art numérique

Environnement | 12mn

Une nouvelle approche économique de la biodiversité

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

À partir de ~~5,50€~~ **4,90€ / mois***
Sans engagement

ou

~~59€~~ **45€ / an****

Je m'abonne

*Pendant 12 mois. Sans engagement ** La 1ère année. Offre valable du 17/11/2025 au 05/01/2026

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

À partir de ~~5,50€~~ 4,90€ / mois*

Sans engagement

Je m'abonne

*Pendant 12 mois. Offre valable du 17/11/2025 au 05/01/2026

En kiosque actuellement

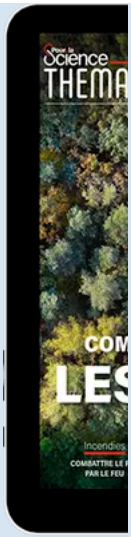
Pour la Science N°577 | **Hors-série Pour la Science N°129** | **Théma P(**

PHYSIQUE Ce que la traque du Higgs doit aux bosons W et Z
Pour la Science
La science expliquée par ceux qui la font
Santé publique
LA BACTÉRIE QUI FAIT RECULER LA DENGUE
Anthropologie
LE POUVOIR DE LA VIE, DU MEXIQUE À AVATAR
Évolution
LES ÉPONGES, PLUS ANCIENS ANIMAUX MULTICELLULAIRES
11/25
JUPITER
La géante qui défie les planétologues

Tous les numéros

Pour la Science
HORS-SÉRIE
La science expliquée par ceux qui la font
Théorie de l'évolution
Ce qu'elle nous dit du passé, du présent et du futur de l'humanité
« Les biologistes de l'évolution peuvent transcender la condition humaine »
Marc-André Selosse
Résister aux IA grâce à Darwin
Une nouvelle façon de voir le cancer

Tous les numéros



To